

УДК 621.311.1.016.35 + 681.51

УСЛОВИЯ ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ КРИТЕРИЯ ПРИТЯЖЕНИЯ И АБСОЛЮТНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

В.Л. Кодкин

В статье приводятся результаты теоретического анализа условий существования скользящих процессов в электромеханических системах. Получены условия скольжения по частотным характеристикам. Впервые показана эквивалентность этих условий и условий абсолютной устойчивости, найденной схемы замещения с релейным элементом.

Ключевые слова: электромеханические системы, системы с переменной структурой, скользящие процессы, абсолютная устойчивость, частотные характеристики.

При проектировании электромеханических систем (ЭМС), как правило, рассматривают их устойчивость. От устойчивости отталкиваются при анализе качества переходных процессов, точности и быстродействия систем. Однако, следует признать, что при оценке переходных процессов в ЭМС правильнее анализировать существование областей притяжения к траекториям- аттракторам, которые соответствовали бы требуемым динамическим характеристикам. Следует отметить, что теория скользящих процессов в системах с переменной структурой (СР в СПС), наиболее близкая к объединению теории устойчивости и теории притяжения терминами последней пользуется весьма редко [1], предпочитая рассматривать условия существования скользящих процессов.

Вместе с тем, как и теория притяжения, теория СР в СПС не стала массово применяться в современных системах управления. Причин этому довольно много, но, несомненно, одна из них- это сложность применения методов теории СПС со СР и теории притяжения для систем с нелинейными, нестационарными звеньями, звеньями высокого порядка, временными задержками и т.п. В тоже время, условия устойчивости разработаны практически для систем любой сложности, природа которых может и не быть полностью раскрыта. Чаще всего, для анализа достаточно экспериментальных данных об объекте, например, его частотной характеристики. В связи с этим, предпринимались неоднократные попытки связать условия устойчивости и притяжения. Если условия устойчивости, вытекающие из условия притяжения, получены довольно давно [2], то получить условия притяжения, вытекающие из условий устойчивости и применить их при синтезе СР в ЭМС до сих пор не удавалось, даже пожертвовав известной точностью. Таким образом, условие, когда ЭМС с областью притяже-

ния устойчива, хорошо известны, а вот условия, при которых устойчивость ЭМС свидетельствует о существовании аттрактора, – не очень.

В работе [3] показано, как условие существования скользящих процессов связано с условием абсолютной устойчивости схем замещения ЭМС. Данная статья является продолжением и развитием работ в этом направлении.

Итак, пусть ЭМС со скольжением, схема которой приведена на рис. 1, описывается уравнением:

$$\begin{cases} T^2 \ddot{x} + K|x| \operatorname{sign} S = 0 \\ S = T_1 \dot{x} + x \end{cases} \quad (1)$$

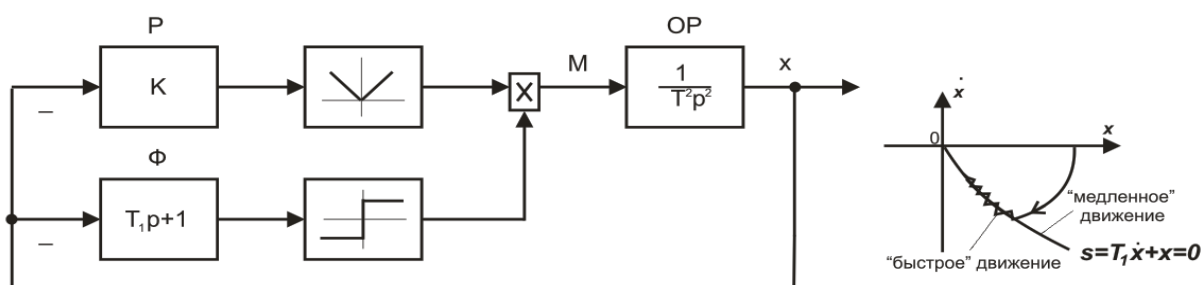


Рис. 1. Структурная схема и фазовая траектория скользящих процессов в ЭМС

Суть этого управления в том, что в определённой области фазового пространства вокруг поверхности $S=0$ создаются условия встречных движений. Фазовая траектория «раскладывается» на два движения: быстрое и медленное. Эти движения обладают необходимой жесткостью к внешним возмущениям и изменению параметров системы. Условия эти находятся следующим образом: при $S = T_1 \dot{x} + x = 0$, в силу уравнения САУ (1) должны выполняться условия:

$$\begin{aligned} \dot{s} > 0, \text{ при } s < 0 \text{ и } \operatorname{sign}(s) = -1; \\ \dot{s} = T_1 \ddot{x} + \dot{x} = T_1 \left(-\frac{kx \cdot \operatorname{sign}(s)}{T^2} \right) + \dot{x} = \frac{kxT_1}{T^2} - \frac{x}{T_1} \geq 0; \\ \text{при } x > 0 \quad \frac{kT_1}{T^2} - \frac{1}{T_1} \geq 0; \quad T_1 \geq \sqrt{\frac{T^2}{k}}. \end{aligned} \quad (2)$$

Итоговое условие связывает передаточные функции объекта регулирования ($\frac{1}{T^2 p^2}$), формирователя траектории переключения ($T_1 p + 1$) и регулятора K .

При этом звено с частотой среза $\omega = \sqrt{\frac{K}{T^2}}$ – это объект регулирования, охваченный обратной связью с регулятором с коэффициентом K .

Таким образом, в системе (1) будет существовать идеальный скользящий процесс вокруг $S=0$, при выполнении условий (2), которые можно сформулировать так:

Постоянная времени формирователя скольжения (или аттрактора) должна быть больше, чем постоянная времени контура, образованного звеном объекта управления и звеном-регулятором.

Это условие можно перенести на частотные характеристики звеньев ЭМС следующим образом:

Условие идеального скольжения выполняется в том случае, если два звена – формирователь скольжения и контур, образованный регулятором и объектом регулирования образуют последовательное соединение, эквивалентная фазовая характеристика которого не переходит значения -90° , причем -90° достигается при $\omega \rightarrow \infty$.

Это условие будет выполняться, если частотные характеристики указанных звеньев будут связаны условием:

$$\operatorname{Re}(W_k \cdot W_\phi) > 0. \quad (3)$$

Это условие равносильно устойчивости [4] схемы замещения, представленной на рис. 2.

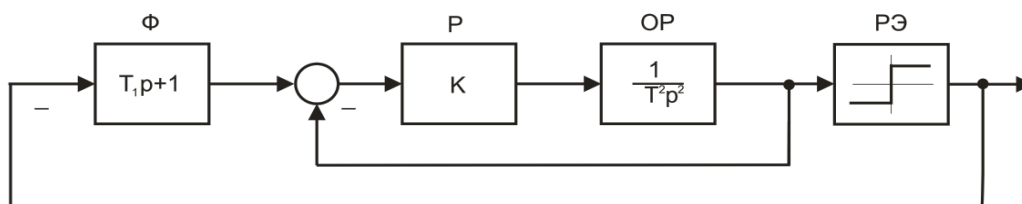


Рис. 2. Схема замещения ЭМС со скользящими процессами

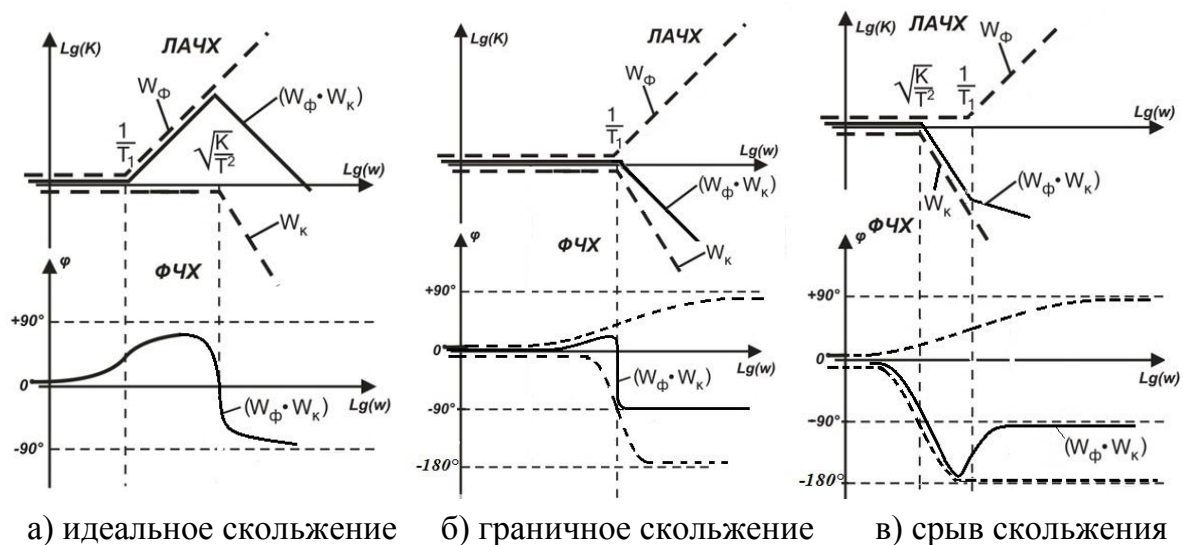


Рис. 3. Условия идеального скольжения в ЭМС по частотным характеристикам структур ЭМС

Выдвинем гипотезу, что условие устойчивости (3), соответствующее условиям идеального скольжения (2), т.е. существованию идеальных условий притяжения, сохранится для любых систем, частотные характеристики которых выполняют условие (3). Тогда, применив критерий Попова [4], можно получить очень удобную интерпретацию различных вариантов режимов скольжения, чрезвычайно важную для практического применения СР в ЭМС.

Идеальное скольжение – Эквивалентный фазовый сдвиг звеньев Φ и Контра не меньше -90° , это равносильно абсолютной устойчивости системы по Попову при $q=0$, частотные характеристики на рис 3а;

– критическое скольжение, – фазовый сдвиг -90° на частоте – граничное состояние устойчивости для схемы на рис. 2, частотные характеристики на рис. 3б;

– реальное скольжение (с разными зонами разрыва), в силу характеристик объекта фазовый сдвиг достигает значения -90° при конечной частоте, которая определит параметры быстрых движений, а условие устойчивости выполнится при $q=0$ рис. 3в;

– форсированное скольжение, при сложном объекте управления, условие (3) выполняется за счет перекрестных связей.

Связь условий скольжения с теоремой абсолютной устойчивости очень хорошо показывает, как будут работать системы с формированием области аттракции, но с конечными коэффициентами в регуляторе.

$$\begin{cases} T^2 \ddot{x} + K|x|S = 0 \\ S = T_1 \dot{x} + x \end{cases} \quad (4)$$

Поскольку условие устойчивости (3) выполняется и при (4), очевидно, что переход от релейного регулятора к управлению вида (4) не нарушает этих условий.

Критерием устойчивости в системе (4) для оценки существования скольжения в исходной системе (1) можно воспользоваться при анализе СР в системе, с практически любым нелинейным объектом т.е. любым, на который распространяется теория абсолютной устойчивости, исключив таким образом подробный анализ каждого конкретного случая, как это делается в теории СР в СПС.

Следует отметить, что выполнение условий (2), которое при выполнении условий (3) не зависит от коэффициентов регулятора, позволяет ввести для ЭМС понятие «структурной устойчивости ЭМС», которая не нарушается при вариациях коэффициентов регуляторов. Поскольку в реальных ЭМС всегда трудно точно определить ряд самых важных параметров, предложенные понятия и условия имеют очень важное практическое значение.

Библиографический список

1. Емельянов, С.В. Новые типы обратной связи: Управление при неопределенности / С.В. Емельянов, С.К. Коровин. – М.: Наука. Физматлит, 1997. – 352 с.
2. Руш, Н. Прямой метод Ляпунова в теории устойчивости / Н. Руш, П. Абетс, М. Лалуа. – М.: «Мир», 1980.
3. Кодкин, В.Л. Оптимальность и устойчивость электромеханических систем / В.Л. Кодкин // «Приоритеты мировой науки: эксперимент и научная дискуссия»: Материалы VIII международной научной конференции 17–18 июня 2015 г. – Ч. 1. Естественные и технические науки. – North Charleston, SC, USA: CreateSpace, 2015. – С. 136–143.
4. Попов, В.М. Гиперустойчивость автоматических систем / В.М. Попов. – М.: Наука, 1970.

[К содержанию](#)